

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОВТОРНО ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ВЫРАБОТКИ С УЧЕТОМ ЗАПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА

В.В. Фомичев, В.Н. Почепов, Л.Я. Фомичева, А.Р. Мамайкин, Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Украина

Представлены результаты моделирования поведения элементов геотехнической системы сопряжения выемочной и очистной выработок поддерживаемых при помощи анкерного крепления. В целях определения качественных и количественных характеристик описания запредельного поведения породных слоев проведены натурные и вычислительные эксперименты. Сравнительный анализ полученных данных позволили определить расчетные показатели основной модели. В результате получена зависимость определяющая оптимальную скорость подвигания очистного забоя.

Сохранение эксплуатационного состояния выемочной выработки на весь период ее использования позволяет снизить производственные издержки, повысить безопасность и обеспечивает повышение интенсивности труда шахтеров. В тоже время, избыточные вложения в закрепление этих выработок приводит к повышению себестоимости добываемого угля. Получение оптимальных технологических решений для выработок, пройденных в схожих горно-геологических условиях, сталкивается с целым рядом проблем связанных, как с особенностями механических характеристик вмещающего породного массива, так и технологиями установки крепления выработок доступных на конкретной шахте [1].

В настоящее время существует большое число методик позволяющих определить на стадии проектирования выработки, какой тип и параметры крепи будут использованы для ее поддержания [2, 3]. Ряд таких методик оперируют формальными признаками и позволяют получать удовлетворительные результаты проектирования, другие строятся на основе натурных наблюдений и интерполируют получаемые результаты на создаваемые объекты. Однако, при условиях когда развитие НДС геотехнологической системы происходит под воздействием ряда факторов описываемых сложным образом, такие решения малоэффективны. В таком случае, необходимо промоделировать состояние выработки с учетом реальной комбинации различных факторов влияющих на ее устойчивость. При этом модель расчетной области следует оптимизировать с учетом результатов натурных исследований проводимых в схожих горно-геологических условиях [1].

Таким образом, целью статьи является разработка эффективной расчетной модели вычислительного эксперимента адекватно описывающей изменение состояние геотехнической модели во времени с учетом изменения геометрии контуров исследуемых выработок.

При проведении вычислительного эксперимента были поставлены следующие задачи: определить адекватность изменения состояния НДС крепи в моделируемой расчетной области при больших деформациях контура выработок; получить прогноз изменения состояния проектируемой геотехнической системы при подвигании очистного забоя; получить описание определения оптимальных показателей скорости подвигания очистного забоя в рассмотренных горно-геологических условиях.

Решение поставленных задач осуществлено на базе комплексного подхода, включающего анализ горно-геологических и горнотехнических условий отработки выемочного участка, обобщение опыта ведения очистных и подготовительных работ при сплошной системе разработки и применяемых при этом конструктивно-технологических схем выемки угля, математического моделирования геомеханических процессов в геотехнической системе [7].

На первом этапе исследований, по определению оптимальной схемы крепления повторно используемых выемочных выработок ш. «Белицкая» были проведены замеры в выработках ш. «Должанская - Капитальная» эксплуатируемых в схожих горно-геологических условиях. Целью проведения этих замеров стало определение деформационных характеристик контура выработки. Затем на основе полученных данных была выверена вычислительная модель [4, 5],

которая затем использовалась при прогнозировании НДС вмещающего породного массива в условиях ш. «Белицкая». Для проверки и подтверждения адекватности этой модели, на ее основе был выполнен расчет для уже пройденной выработки в которой на расстоянии 30 – 50 м друг от друга были установлены датчики напряжений в сталеполимерных анкерах. Замеры выполнялись в реальном масштабе времени и были обобщены в графики рассмотренные ниже. Выбранная схема установки анкерного крепления приведена на рисунке 1. Именно в соответствии с ней были сформированы графики на рисунках 2 – 4.

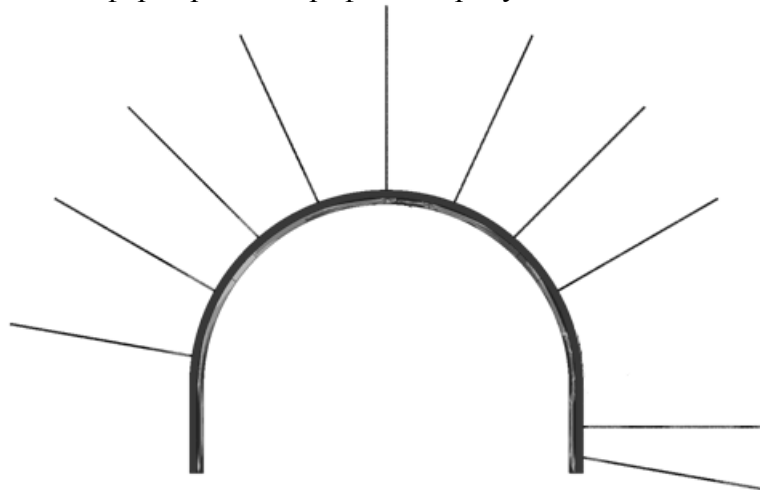


Рис. 1. Схема установки анкерной крепи выбранная для проведения расчетов

Наибольший интерес, с точки зрения качественных изменений максимальных приведенных напряжений [6], представляют собой анкера, установленные в берме штрека (рис. 2). При сравнении натурных и расчетных значений по верхнему анкеру сразу видно, что вторые качественно повторяя первых, превосходят их в абсолютных величинах в среднем на 7 – 8 %. Перепад напряжений в районе нулевой точки графика определяется качественным изменением условий работы анкеров и для верхнего анкера эти изменения выражены четче. Для нижнего анкера имеем другую картину. Расчетные напряжения меньше результатов замеров и в районе нулевой отметки прохождения груди очистного забоя происходит значительное расхождение режимов работы анкеров. Однако величина градиентов этих измерений незначительна, а сдвигание точки перегиба графика расчетных напряжений дальше от нулевой отметки очевидно вызвано отсутствием моделирования расслоения пород почвы при высоких градиентах скорости их пучения.

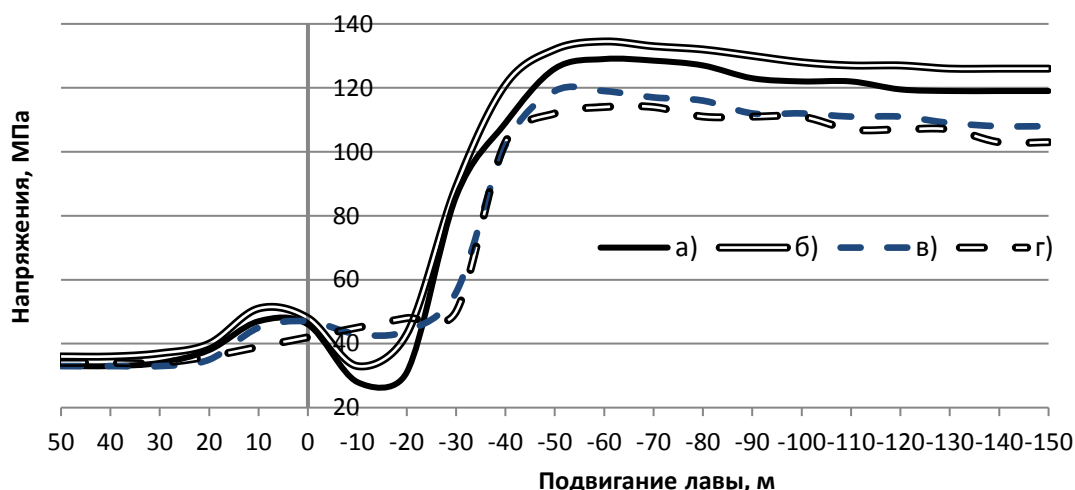


Рис. 2. Изменение напряженного состояния анкеров установленных в берме штрека а) натурные и б) расчетные значения верхнего, а в) натурные и г) расчетные значения нижнего

После прохождения очистного забоя, на расстоянии от него более 60 м, наблюдается ступенчатая характеристика падения напряжений в анкерах. Эта особенность просматривается

и в натурных замерах и в результатах расчетов. Как уже указывалось, данная расчетная модель была реализована с учетом реологии пород, что данных горно-геологических условиях оказалось необходимым. Наблюдаемые уступы представляю собой реакцию анкеров на опускание основной кровли вызванное подвиганием очистного забоя.

В целом же расчетная модель анкеров, если рассматривать ее как единую грузонесущую конструкцию, промоделирована с высокой степенью точности поскольку суммарные отклонения расчетных и натурных данных для обоих анкеров находятся в интервале 2 – 6 %, что полностью находится в диапазоне вычислительной погрешности.

Другой особенной группой анкеров, поведение которых подверглось сравнительному анализу стали анкера, установленные ниже замков податливости рамной крепи (рис. 3).

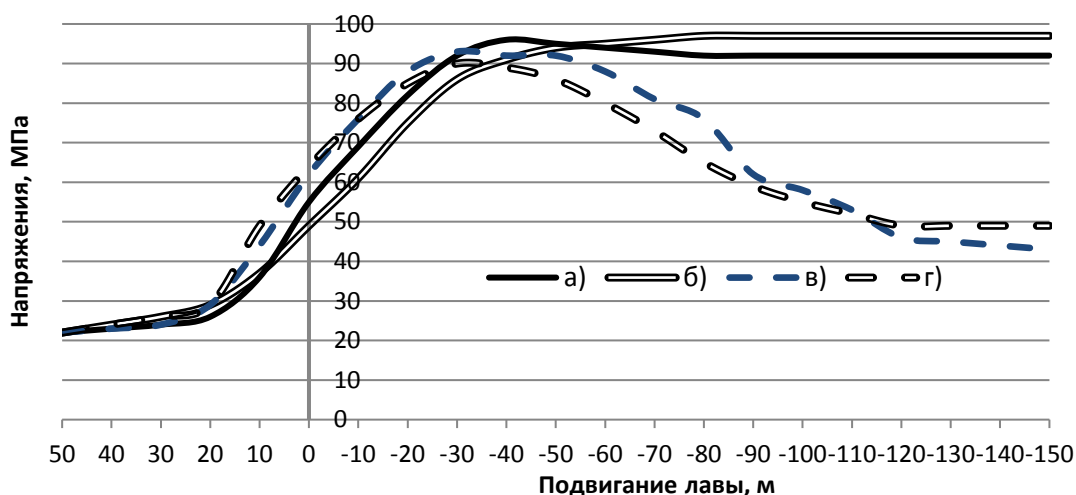


Рис. 3. Изменение напряженного состояния анкеров установленных ниже замков рамной крепи, а) натурные и б) расчетные значения для анкера со стороны нетронутого массива, а в) натурные и г) расчетные значения для анкера со стороны очистного забоя

До момента удаления очистного забоя от расчетной точки на расстояние более 50 м режим работы рассматриваемых анкеров и со стороны нетронутого массива и со стороны очистных работ, в целом, совпадают. Для анкера, установленного со стороны очистного забоя, количественные отклонения в расчетных и замерных данных находятся в пределах 6 %, а для противоположного – разрывы в значениях достигают 16 %. После прохождения этой точки, нагрузка на анкер со стороны нетронутого массива стабилизируется, в то время как анкер, установленный в сторону очистной выработки, испытывает все меньшие напряжения. Кроме того, качественно различаются картины изменения максимумов напряжений при расчете и замерах для данного анкера. Абсолютные отклонения полученных значений уже превышают 19 %, что может указывать на качественное отображение реальной картины распределения НДС породного массива при проведении вычислительного эксперимента. Очевидно, что в расчетной модели не удалось полностью описать все особенности развития НДС системы «породный массив – крепь – охранная конструкция» во времени. Однако, данная особенность проявляется только на отрезке между –50 до –80 м, что позволяет говорить только о частичном несоответствии принятых ограничений расчетной модели.

Представленные на рис. 4 графики изображают изменение максимумов приведенных напряжений в анкерах, располагающихся в кровле выемочной выработки справа и слева от центрального. Как и на рис. 4 анкер (первый), установленный со стороны нетронутого массива, и анкер (второй), установленный в сторону очистной выработки, работают в разных режимах. Когда первый еще не воспринимает значительных нагрузок со стороны породного массива, второй еще до подхода очистного забоя оказывается в зоне ПГД. При этом его нагрузка и разгрузка происходят скачкообразно, но со значительно меньшими абсолютными значениями, чем у анкера, установленного в сторону нетронутого породного массива.

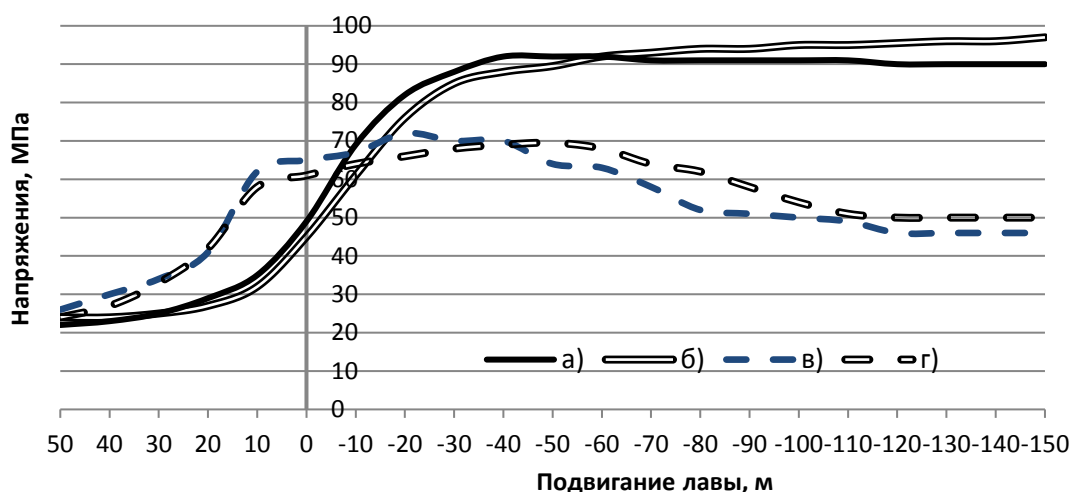


Рис. 4. Изменение напряженного состояния анкеров установленных рядом с центральным, а) натурные и б) расчетные значения для анкера со стороны нетронутого массива, а в) натурные и г) расчетные значения для анкера со стороны очистного забоя

Для первого анкера расчетные и натурные значения напряжений качественно и количественно совпадают. Абсолютное отклонение полученных результатов находится в пределах 11 %, но с удалением груди очистного забоя от плоскости замерной станции происходит разделение характера изменения максимумов напряжений для натурных и расчетных значений. Расчет показывает рост напряжений, а измерения в шахте – незначительное снижение их максимумов в теле анкера. Данная особенность, очевидно, вызвана ориентацией и местоположением границы предельного состояния пород приконтурного горного массива [8]. Очевидно, что для расчетной области эта граница оказалась ближе к контуру повторно используемой выработки.

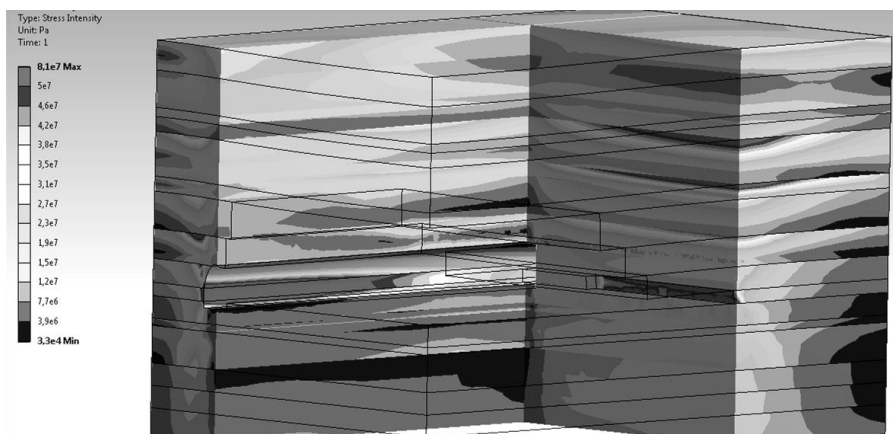
Теперь перейдем к следующему этапу исследований, на котором реализуем полученную расчетную модель для прогнозирования изменения состояния сопряжения выработок при движении очистного забоя. Полученные характеристики расчетной области применим при моделировании НДС сопряжения выработок которое возникает под воздействием подвигания очистного забоя в условиях ш. «Белицкая».

Расчет производился в двух шаговой постановке. На первом шаге решалась «мгновенная» упругопластическая задача и на втором шаге, на основании полученного НДС первого, проводились вычисления уже с учетом реологических кривых полученных экспериментальным образом [10]. Полученные данные по своей структуре хорошо согласовываются со второй моделью текучести материала программы ANSYS Time Hardening [9], которую описывает следующее выражение

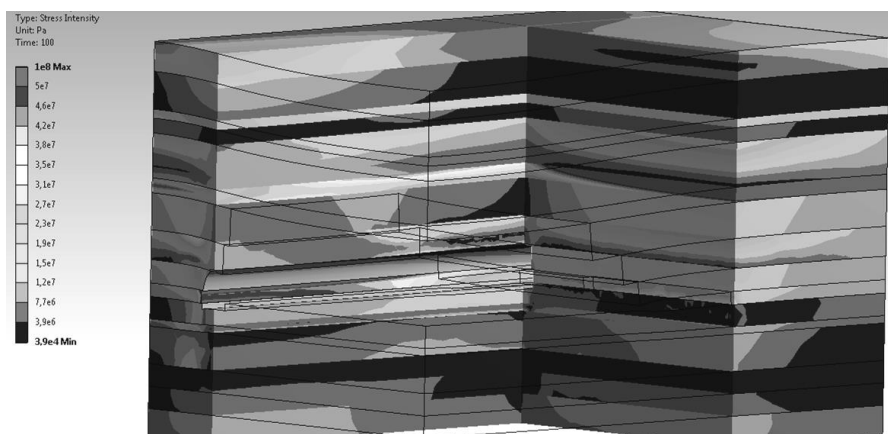
$$\dot{\varepsilon} = C_1 \cdot \sigma^{C_2} \cdot t^{C_3}, \quad (1)$$

где $\dot{\varepsilon}$ – эквивалентные пластические деформации; C_1, C_2, C_3 – экспериментально определяемые коэффициенты показывающие изменение НДС системы в зависимости от характеристик материала, значения эквивалентных напряжений σ и текущего расчетного времени t .

На рисунке 5 показано распределение интенсивности напряжений σ на плоскостях трехмерной модели, соответствующих плоскости вертикальной оси симметрии штрека и плоскости очистного забоя. Сравнение рис. 5, а и рис. 5, б сразу позволяет сделать вывод о качественных и количественных изменениях в НДС породного массива. Во втором случае напряжения сконцентрированы в породном слое поддерживающем основной свод очистного забоя и в боку выработки, то есть с течением времени происходит разгрузка приконтурного горного массива и на момент времени представленный на рис 5, б возникают условия к разрушению очередного породного слоя в кровле очистного забоя. При этом зона повышенного горного давления перед лавой полностью исчезает, а напряжения в штреке позади лавы начинают падать на величину 8 – 12 МПа.



а)



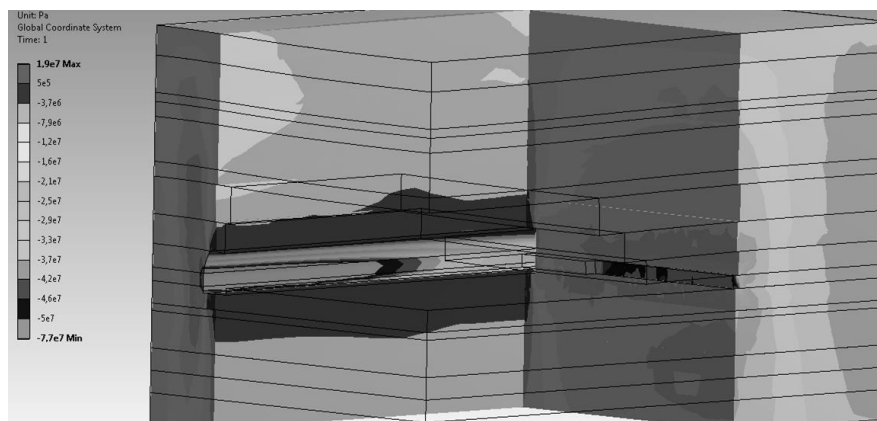
б)

Рис. 5. Эпюры интенсивности напряжений σ полученные: а) по окончании первого шага расчета (упругопластическая постановка) и б) на момент 100 суток с учетом реологии пород (второй шаг)

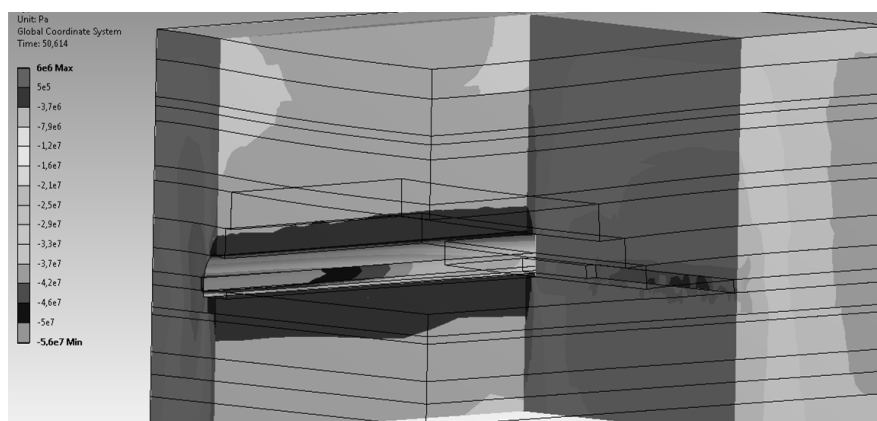
В результате выполненных расчетов было показано распределение интенсивности напряжений σ на плоскостях трехмерной модели, соответствующих плоскости вертикальной оси симметрии штрека и плоскости (груди) очистного забоя. Сравнение окончательных результатов упругопластического расчета и расчета с учетом фактора времени сразу позволяет сделать вывод о качественных и количественных изменениях в НДС породного массива. Во втором случае напряжения сконцентрированы в породном слое, поддерживающем основной свод очистного забоя и в боку выработки, то есть с течением времени происходит разгрузка приконтурного горного массива и на момент времени 100 суток возникают условия к разрушению очередного породного слоя в кровле очистного забоя. При этом зона повышенного горного давления перед лавой полностью исчезает, а напряжения в штреке позади лавы начинают падать на величину в 8 – 12 МПа.

То есть, в представленных горно-геологических условиях учет реологии пород позволяет при проведении вычислительного эксперимента получить изменение НДС геотехнической системы максимально соответствующее современным представлениям о формировании и изменении зоны ПГД в примыкающим к очистному забою породном массиве [11].

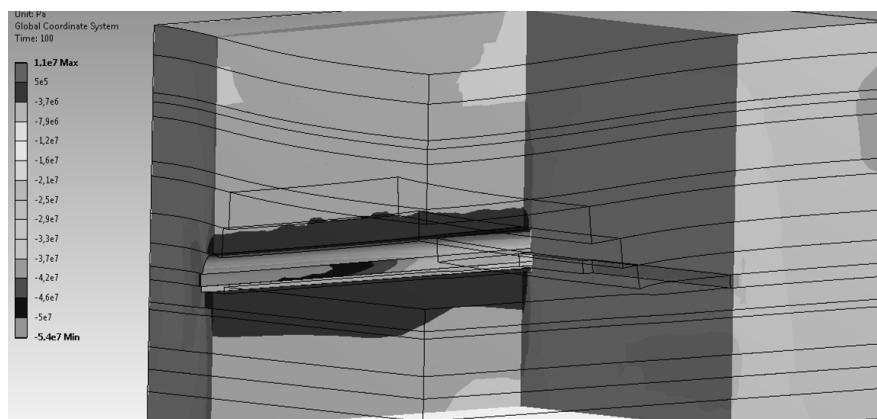
Наиболее характерными из полученных результатов являются эпюры распределения вертикальных напряжений σ_y (рис. 6). Во-первых, доминирующими напряжениями породного массива, в вертикальном направлении, являются сжимающие, градиент которых практически не зависит от слоистости массива. Во-вторых, незначительные зоны растягивающих напряжений образуются по оси выработки в своде и на почве.



а)



б)



в)

Рис. 6. Эпюры вертикальных напряжений σ_y полученные по результатам расчетов: а) первого шага; б) на 50-ые сутки второго шага; в) второго шага

Со временем картина напряжений в почве выработки изменяется незначительно: абсолютные значения напряжений менее 3 %, объем зоны растягивающих напряжений в пределах 1 – 4 %. Это указывает на незначительное влияние реологии породного массива при формировании пучения почвы в рассматриваемых горно-геологических условиях. С другой стороны в результате упругопластического расчета в кровле выработки была получена «волна» растягивающих напряжений пик которой приходится на зону сопряжений породных слоев основной кровли и последнего слоя алевролита разрушенного за очистным забоем. С учетом реологии на эпюрах напряжений σ_y эта особенность НДС породного массива не наблюдается. Однако, это позволяет сделать выводы, что данная особенность может серьезно влиять на формирование разгрузочной полости в кровли выработки в момент времени близкий к моменту обрушения непосредственной кровли очистного забоя.

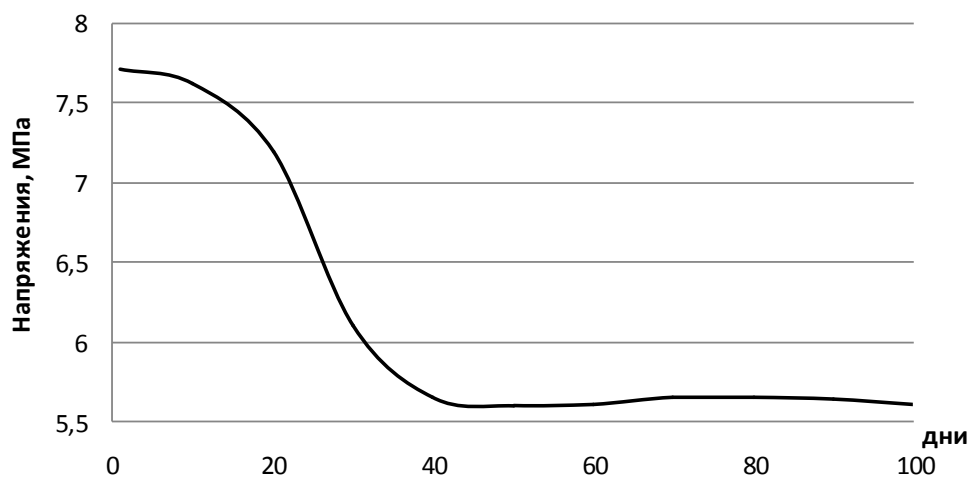


Рис. 7. Изменение максимума вертикальных напряжений в модели сопряжения выемочной выработки и очистного забоя при двухшаговом расчете

Теперь рассмотрим изменение максимума вертикальных напряжений σ_y на всем временном интервале расчета (рис. 7). Как видно, на интервале до 10-ти суток максимум напряжений σ_y оставался практически неизменным (в пределах линейного отклонения в 1 – 2 %), полученным по результату расчета упругопластической модели. Затем начинается стремительное падение напряжений достигающее величины в 36 % и начиная с 38-мых суток значения напряжений опять стабилизируются и уже значительно не изменяются до конца расчета. Это говорит о том, что выбранный временной интервал полностью включает в себя все основные фазы поведения реологической среды. А значит, полученное решение является полным в смысле физико-математического описания поведения горных пород как механической среды.

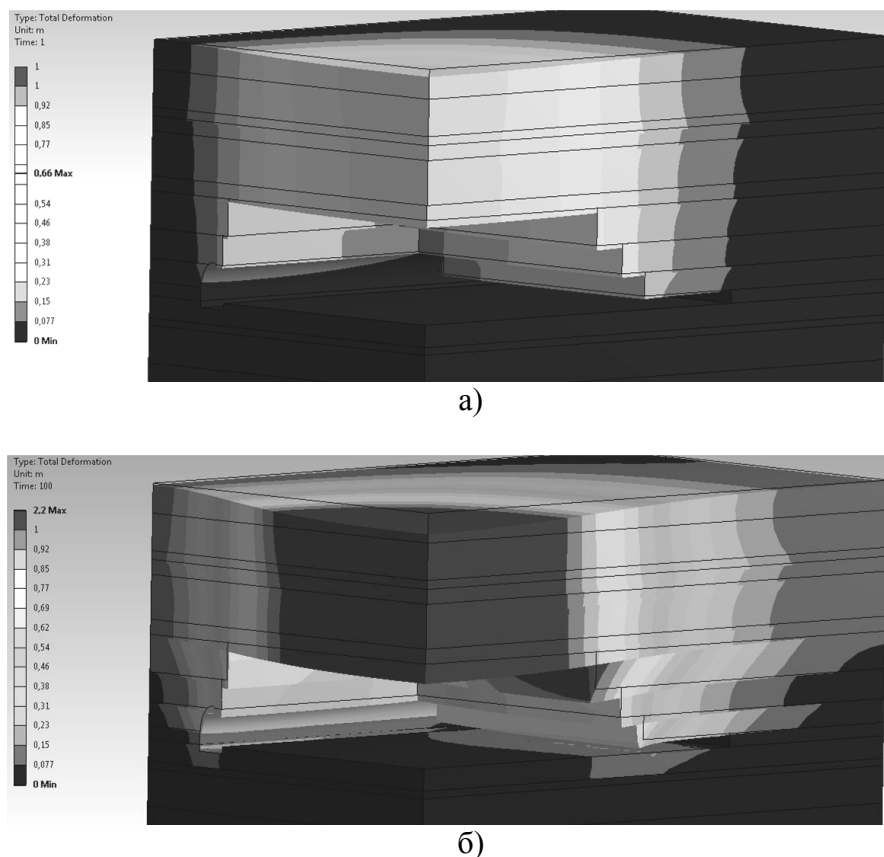


Рис. 8. Эпюры полных перемещений расчетных точек породных слоев основной кровли очистного забоя по результатам расчета: а) первого шага (упругопластическое решение) и б) второго шага расчета (реология)

Изменения в полных перемещениях носят в основном количественный характер (см. рис. 8). Как видно, на первом шаге расчета максимальные перемещения не превысили отметку в 0,66 м, то по окончанию второго шага расчета они составили 2, 23 м. При этом на конечной фазе расчета реологии, после 70-и суток, темп перемещений снизился, поскольку слои основной кровли легли на обвалившуюся за лавой породу. Полученная для окончания расчета картина напряжений указывает на отсутствие смещений угольного пласта перед грудью очистного забоя, тогда как со стороны нетронутого массива, на конечном этапе реологического расчета, модель угольного пласта демонстрирует стремление к смещению в сторону выработки.

Другой особенностью полученных перемещений стали качественные изменения в породах примыкающих к модели механизированной крепи. Во первых, в породах почвы происходит вдавливания стоек механизированной крепи на глубину до 0,26 м, во вторых, породные слои зависающие над стойками крепи изменяют свое механическое поведение и начинают деформироваться не согласовано, причем данный эффект наблюдается и над выемочной выработкой хотя и в значительно меньшей степени. Это обуславливается различными значениями семейства коэффициентов C_1, C_2, C_3 для более прочного песчаника и слабого алевролита, за счет чего реологические кривые алевролита имеют более пологий вид с большим, чем у песчаника абсолютными значениями во времени.

Чтобы проанализировать возникшую особенность были построены графики роста деформации, представленные на рис. 9. Сразу следует отметить, что со временем рост деформаций песчаника оказывается значительно меньшим, а изменения в породных слоях алевролита примыкающим к нему значительно разнятся. Чем ближе к породам основной кровли располагается слой алевролита, тем значительней рост деформаций со временем: график а – максимум 0,25 м; график б – 0,49. При этом, хотя нижний слой алевролита деформируется быстрее его поведение близко к линейному и соответствует поведению песчаника, что объяснимо, поскольку именно песчаник передает основную нагрузку на модель данного породного слоя.

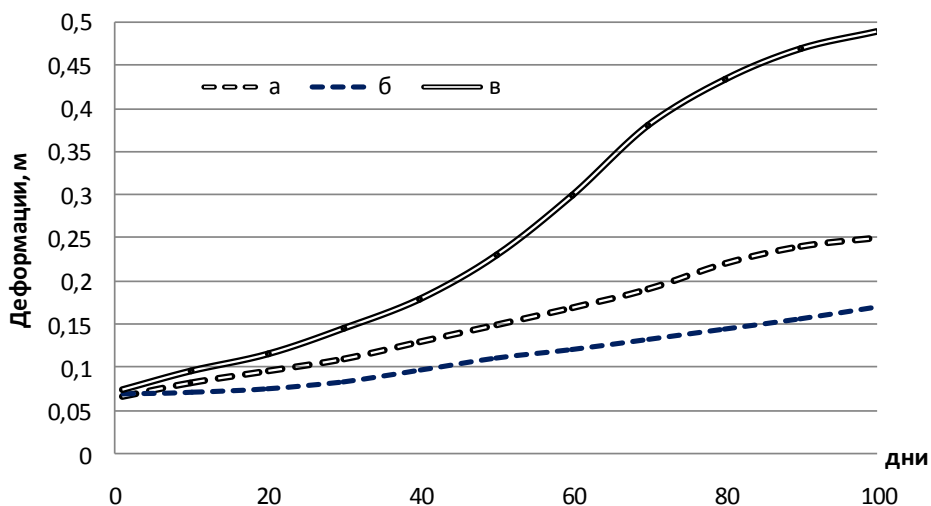


Рис. 9. Рост деформаций при расчете с учетом реологии в пластах основной кровли очистной выработки: а) алевролит; б) песчаник; в) алевролит верхний

Рассматривая графики, представленные на рис. 9, можно выделить три характерных зоны изменения НДС породного массива. Первая характеризуется поведением горного массива как механической среды близким к условиям упругопластического материала. Верхняя граница этой зоны находится в районе 17 – 20 расчетных суток. После этого происходит разупрочнение вмещающих горных пород сопровождающееся ростом деформаций. Этот процесс тормозится в районе 63 – 70 суток. Затем наступает стабилизация, нарушение которой может сопровождаться обрушением в кровле следующего породного слоя.

Анализ выше изложенных данных позволяет определить значения оптимальных скоростей подвигания очистного забоя, в зависимости от структуры и механических характеристик

углеводородного породного массива. В этом смысле условием, при котором наступает обрушение очередного породного слоя в непосредственной кровле очистного забоя, является наличие пика взаимного влияния функции вертикальных напряжений и показателя изменения этих напряжений в текущем породном слое. Это создает условие для формирования магистральных трещин увеличивающихся в результате расслоения породного массива по плоскостям напластования, что приводит к потере сплошности породного массива и образованию породного блока. Это хорошо иллюстрируется графиками, представленными на рис. 9.

Таким образом, скорость подвигания очистного забоя должна обеспечить такой технологический интервал при котором породы непосредственной кровли очистного забоя в области сопряжений с выемочной выработкой остаются в достаточной мере устойчивыми непосредственно за очистным забоем, то есть способны воспринимать нагрузку без разрушения, с одной стороны, и не подвергаются повышенным вертикальным сжимающим напряжениям, с другой стороны.

В ходе проведенных исследований была получено следующее выражение позволяющее определить приемлемую скорость подвигания очистного забоя

$$V = 2,17 \frac{L_{\max}}{T_l} \quad (2)$$

где L_{\max} - расстояние в метрах между грудью очистного забоя и максимумом «волны» вертикальных напряжений возникающих вдоль выемочной выработки (см. рис. 6, а); T_l - временной интервал соответствующий верхней площадки напряжений на рис. 7.

Для рассматриваемого решения задачи по определению оптимальных показателей устойчивости сопряжения выемочной и очистной выработки скорость подвигания должна составлять не менее 5 м в сутки.

Выводы. При прогнозе эксплуатационного состояния повторно используемой выработки определяющим фактором является развитие деформации контура породного массива. Учет предельного состояния породных слоев позволяет получить согласованную качественную (трехфазную) и количественную (усредненное отклонение до 7 %) картину распределения внутренних усилий геотехнической модели. Полученная математическое выражение дает возможность спрогнозировать оптимально допустимую скорость подвигания очистного забоя при выбранной схеме крепления выемочной выработки

Список литературы

1. Фомичев В.В. Предпосылки построения расчетных моделей рамно-анкерной крепи с учетом нелинейных характеристик поведения физических сред / Науковий вісник НГУ – 2012. – № 4. – С. 54-58.
2. Джергер Ч. Механика горных пород и инженерные сооружения. – М.: Мир, 1975. – 540 с.
3. V. Fomychov, V. Lapko, V. Pochepov Bolt support application peculiarities during support of development workings in weakly metamorphosed rocks Materials of VII International scientific-practical conference “School Underground Mining - 2013” / “Mining of Mineral Deposits”. – Netherlands: CRC Press / Balkema. – P. 211-217.
4. В.В. Фомичев, Р.В. Зубер, Г.П. Сівак Особливості обчислювального моделювання взаємодії анкера і порід гірського масиву / Науковий вісник НГУ – 2010. – № 6. – С. 21-25.
5. Зацепин М.А. Прогноз напряженно-деформированного состояния пологозалегающего массива горных пород на основе численных методов. – В сб.: «Проблемы недропользования 2008». Материалы II Всероссийской молодежной научно-практической конференции по проблемам недропользования, УРО РАН, Екатеринбург, 2008. – с. 373-378.
6. Совершенствование технологии сохранения устойчивости повторно используемых выемочных выработок при обратном порядке отработки лав / А.Ф. Булат, А.Д. Алексеев, Л.В. Байсаров и др. – Донецк: ДУНВГО, 2004. – 24с.
7. Каханер Д, Моулер К., Неш С. Численные методы и программное обеспечение. – М.: Мир, 1998. -575 с.
8. Zienkiewicz, O. The Finite Element Method / O. Zienkiewicz, R. Taylor. –Vol. 1: The Basic. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. – 689 p.
9. Rosenblatt, J. Mathematical Analysis for Modeling / J. Rosenblatt, S. Bell. – Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. – 853 p.
10. Демченко А.И. Влияние скорости подвигания лавы на смещения пород в выемочных выработках // Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк: 2004. - № 7. С. 119-121.
11. Выгодин М.А. Обоснование параметров армопородных грузонесущих конструкций на базе рамно-анкерных крепей и технология их сооружения в выработках шахт Западного Донбасса: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск: ДГИ, 1990. – 25 с.